

Investigation numérique de la combustion turbulente du mélange Propane-Air dans un brûleur

S.MORSLI^a, A. SABEUR-BENDEHINA^a

a. Laboratoire d'Energie et Propulsion Navale, Faculté de Génie Mécanique, USTO
BP 1505 El M'naouer Oran, Algérie

Résumé :

Cette étude considère la simulation numérique de la combustion du propane avec de l'air, dans un brûleur. Dû à la haute température et aux forts gradients de vitesse dans la chambre de combustion, les effets du rapport d'équivalence (ϕ) et du pourcentage d'oxygène (γ) dans l'air sont étudiés pour différentes valeurs de (ϕ) entre 0,5 et 1,0 et de (γ) entre 10 et 30%. Dans chaque cas, la combustion est simulée pour le débit massique de carburant aboutissant à la même vitesse de transfert de chaleur (Q). Les calculs numériques sont réalisés pour tous les cas avec l'utilisation du code CFD Fluent. Les résultats montrent que l'augmentation du rapport d'équivalence correspond à une diminution significative des taux de réaction maximale et la température augmente avec l'augmentation du pourcentage d'oxygène. Le mélange d'hydrogène avec du propane entraîne une réduction considérable des niveaux de température et réduction conséquente des émissions de CO.

Abstract

This study considers numerical simulations of the combustion of propane with air, in a burner. Due to the high temperature and velocity gradients in the combustion chamber; the effects of equivalence ratio (ϕ) and oxygen percentage (γ) in the combustion air are investigated for different values of ϕ between 0.5 and 1.0 and γ between 10 and 30%. In each case, combustion is simulated for the fuel mass flow rate resulting in the same heat transfer rate (Q). Numerical calculations are performed individually for all cases with the use of the Fluent CFD code. The results shown that the increase of equivalence ratio corresponds to a significantly decrease in the maximum reaction rates and the maximum temperature increase with the increases of oxygen percentage. Mixing hydrogen with propane causes considerable reduction in temperature levels and a consequent reduction of CO emissions.

Mots clefs : transfert de chaleur, combustion, turbulence, computer fluid dynamics.

1 Introduction

Les Phénomènes de combustion se composent de nombreux processus physiques et chimiques qui présentent un large spectre d'échelles de longueurs et de temps à déterminer. Une description mathématique de la combustion n'est toujours triviale [1].

La combustion peut être caractérisée comme une (ou des) réaction(s) irréversible(s) fortement exothermique(s) entre un combustible (ou réducteur) et un comburant (ou oxydant) selon le schéma global :

Combustible + comburant \rightarrow produits de combustion + énergie thermique

Plus précisément, cette réaction induit un fort dégagement de chaleur dans une zone très mince (les épaisseurs typiques de l'ordre de 0,1 à 1 mm) conduisant à des gradients thermiques très élevés (le rapport des températures entre réactifs et produits de combustion est couramment de 6 à 8) et à de larges variations de la masse volumique ρ . Le taux de réaction rapide et fortement non linéaire (Loi d'Arrhenius).

La construction de brûleur définit l'efficacité de la combustion ; et l'un des principaux objectifs de la conception du brûleur est de développer le rendement de combustion et de réduire au minimum les émissions dangereuses pour l'environnement [2], tels que CO, les hydrocarbures imbrûlés (HC) et les NO.

Les phénomènes de combustion sont un mélange complexe de la dynamique des fluides et de la chimie. Par conséquent, la dynamique des fluides numérique (CFD) peut servir d'outil puissant, et peut être employée pour réaliser les études paramétriques peu coûteuses impliquant des paramètres de conception critiques de brûleur. Les codes- CFD résolvent les équations de la masse, et d'énergie afin de calculer les champs de vitesse, de pression et de température.

Afin d'étudier l'effet du pourcentage d'oxygène sur la combustion, la combustion du propane avec l'air a été considérée à différents pourcentages d'oxygène en utilisant le code CFD Fluent [3].

2 Description du problème

La chambre de combustion cylindrique étudiée dans ce travail est schématisée dans la figure (1) ci-dessous, et la flamme considérée est une flamme de diffusion turbulente.

Le modèle axisymétrique bidimensionnel et la configuration géométrique du brûleur sont présentés sur le schéma 1. Comme montré dans cette figure, le propane et les prises d'air sont coaxiaux et la fusion est en aval. On suppose que la paroi du brûleur est aux conditions ambiantes et que les parois voisines des prises de carburant et d'air sont isolées.

La longueur, et le diamètre de la chambre de combustion sont respectivement :

$L = 0.5\text{m}$, $R = 0.05\text{m}$. Les diamètres r_b , r_i , r_o sont respectivement de l'ordre de 0.004, 0.006, 0.01.

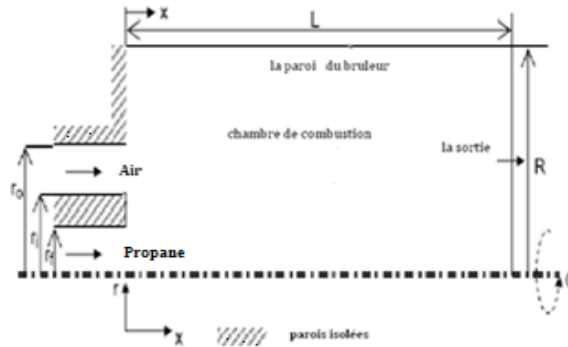


FIG. 1 – Géométrie du brûleur propane –air étudiée

2.1 Formulation mathématiques:

L'équation de conservation de masse est :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

L'équation de conservation de masse pour l'espèce k s'écrit :

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho (u_i + v_{k,j}) Y_k \right) = \dot{\omega}_k \quad \text{Pour } k = 1, N \quad (2)$$

Avec $v_{k,j}$ la composante j de la vitesse de diffusion v_k de l'espèce k et $\dot{\omega}_k$ est le taux de production de l'espèce k.

L'équation de la quantité de mouvement se trouve inchangée par la réaction chimique, elle s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_i u_j + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i u_j = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{i,j}}{\partial x_i} + \rho \sum_{k=1}^N Y_k f_{k,j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho \sum_{k=1}^N Y_k f_{k,j} \quad (3)$$

$$\text{Avec : } \tau_{ij} = -\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

L'équation de la conservation d'énergie est la plus affectée par la combustion, elle peut être écrite sous plusieurs formes, une des plus utilisées est celle de l'enthalpie sensible :

$$\frac{\partial \rho H_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h_s) = \omega_T + \dot{Q} + \frac{DP}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho \sum_{k=1}^N V_{k,i} Y_k h_{s,k} \right) \quad (5)$$

Dans ce travail on a utilisé le modèle RNG k-ε [4] ; L'énergie cinétique de la turbulence "k" son taux de dissipation ε sont obtenus par les équations suivantes:

$$\frac{\partial (\rho K u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_K (\mu + \mu_t) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + G_K - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{K} (C_{1\varepsilon} G_K - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) - \chi$$

La modélisation des taux de réaction de cette étude est faite avec le modèle Eddy Dissipation dans laquelle la chimie est considérée très rapide par rapport à la turbulence représenté par:

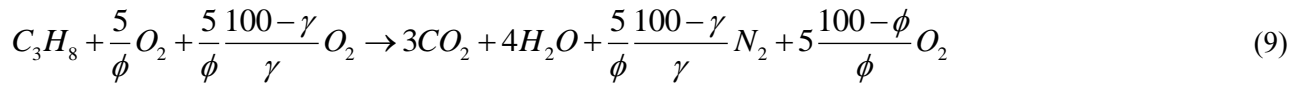
$$R_{i,r} = v_{i,r}' W_{\omega,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min_R \left(\frac{Y_R}{v_{R,r}' W_{\omega,R}} \right) \quad (7)$$

$$R_{i,r} = v_{i,r}' W_{\omega,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\sum_p p Y_p}{\sum_j v_{j,r}' W_{\omega,j}} \right) \quad (8)$$

3 La combustion et le mécanisme réactionnel

Les processus de combustion les plus communs produits dans la technologie sont ceux qui convertissent un carburant .Ils sont habituellement exothermiques (c.-à-d. ils libèrent l'énergie chimique contenue dans les carburants en tant qu'énergie thermique).

Dans notre cas la combustion du propane avec de l'air est modelée avec un mécanisme en une seule étape de réaction (NR = 1 et espèces numérotent, N=5) Le mécanisme de réaction a lieu selon les contraintes de la chimie, est défini par :



$$\text{Avec: } \phi = 5[W_{O_2} + (100-\gamma)/\gamma W_{N_2} \dot{m}_{fuel}] / (W_{fuel} \dot{m}_{air}) \quad (10)$$

4 Méthode numérique et simulation

La simulation a été réalisée par le code de calcul C.F.D Fluent dans sa version 6.3.26. Ce logiciel dispose d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides, turbulence (LES, KE, Kw, SA, Reynolds stress...), combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé).etc.

Le RNG k-ε a été choisi comme modèle de turbulence. L'adaptation des constantes du modèle donné par Launder et Spalding [4] rend le système d'équation opérationnel. Les tableaux 2, et 3 nous indiquent les vitesses d'entrées d'air et les richesses pour φ =0.5, 0.7 et 1, et les propriétés thermophysiques de l'air et de propane respectivement. Ces propriétés sont supposées constantes.

L'Algorithme simple a été choisi pour traiter les problèmes du couplage pression-vitesse et le schéma upwind de 2eme ordre pour le calcul de vitesse.

Tableau 2. Conditions physiques

T	300k
h_{amb}	10W/m ² K
P_{op}	101325 Pa
P propane	1.91 kg/m ³
ρ_{air}	1.225 kg/m ³

Tableau 3. vitesses d'entrée d'air et rapports stœchiométriques air/fuel pour $U_f=2.247$ m/s et $\dot{Q}=10000$ W.

U air [m/s]			
γ [%]	$\phi=0.5$	$\phi=0.7$	$\phi=1$
10	56.436	40.312	28.218
20	28.614	20.439	14.307
30	19.340	13.814	9.670

5 Résultats numériques

5.1 Maillage de la géométrie

Le maillage de calcul élaboré est uniforme dans chaque partie. Le domaine a été subdivisé en 15000 cellules (350×50) dont (250×50) cellules de 0 à 0.25m (région de dense-maille) et (50×50) cellules de 0.25 à 0.50 (région de lâche-maille). (FIG.2)

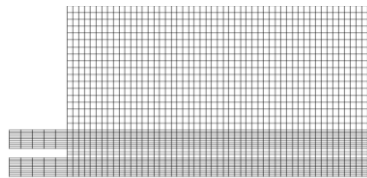


FIG.2- Maillage de la géométrie du brûleur.

5.2 Résultats et discussions

5.2.1 Taux de réactions

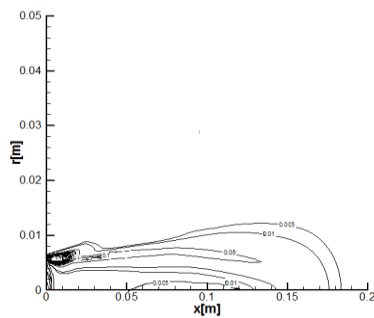
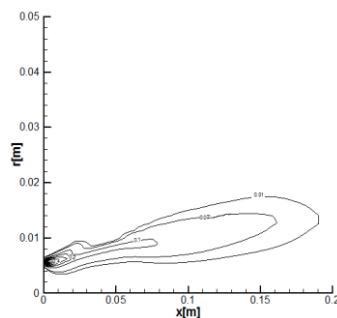
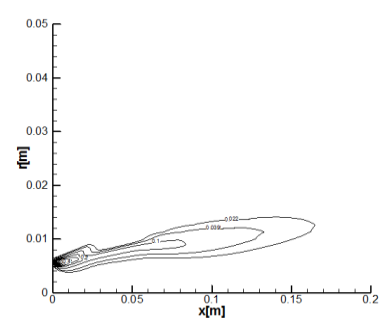
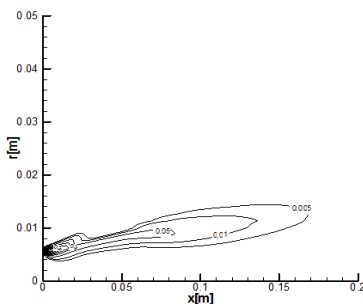
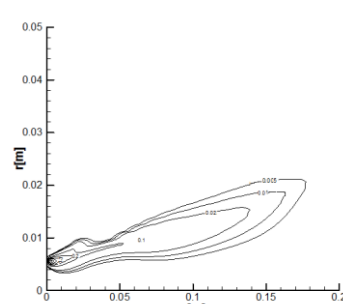
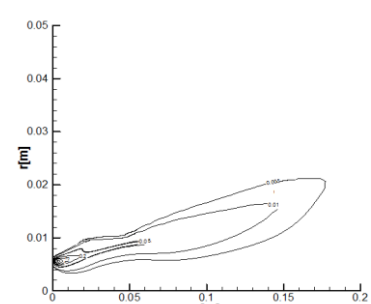
Pour ($\phi = 0.5$ et $\gamma = 10\%$)Pour ($\phi = 0.5$ et $\gamma = 30\%$)Pour ($\phi = 0.7$ et $\gamma = 20\%$)Pour ($\phi = 1.0$ et $\gamma = 10\%$)Pour ($\phi = 1.0$ et $\gamma = 20\%$)Pour ($\phi = 1.0$ et $\gamma = 30\%$)

FIG. 3 – Contours de taux de réactions pour différentes richesses et pourcentages d'oxygène.

Un processus chimique de combustion est en fait une succession de coupures et de créations de liaisons entre les molécules. Chaque coupure et création de liaison est une réaction élémentaire, l'ensemble des réactions élémentaires constitue le mécanisme cinétique du processus réactionnel. On a simulé la flamme propane-air pour les richesses $\phi=0.5, 0.7$ et 1 .

La figure (3) montre la distribution de taux de réactions dans la chambre de combustion pour les différentes richesses et pourcentages d'oxygène ($\phi=0.5, 0.7$ et 1.0), et ($\gamma=10\%, 20\%$ et 30%). On remarque la présence d'un grand tourbillon torique qui forme une zone de recirculation. Ce dernier est généré par la forme de la chambre de combustion qui présente un élargissement brusque et entame un contournement de l'écoulement dans la zone de réaction. Il a été constaté qu'avec l'augmentation du pourcentage de l'oxygène γ de (10% à 30%), ces taux de réactions diminuent dans la direction axiale du brûleur par contre ils augmentent dans la direction radiale. Cependant, le taux de réaction diminue de manière significative avec l'augmentation de pourcentage de l'oxygène γ .

5.2.2 Distributions de la température et des fractions massiques

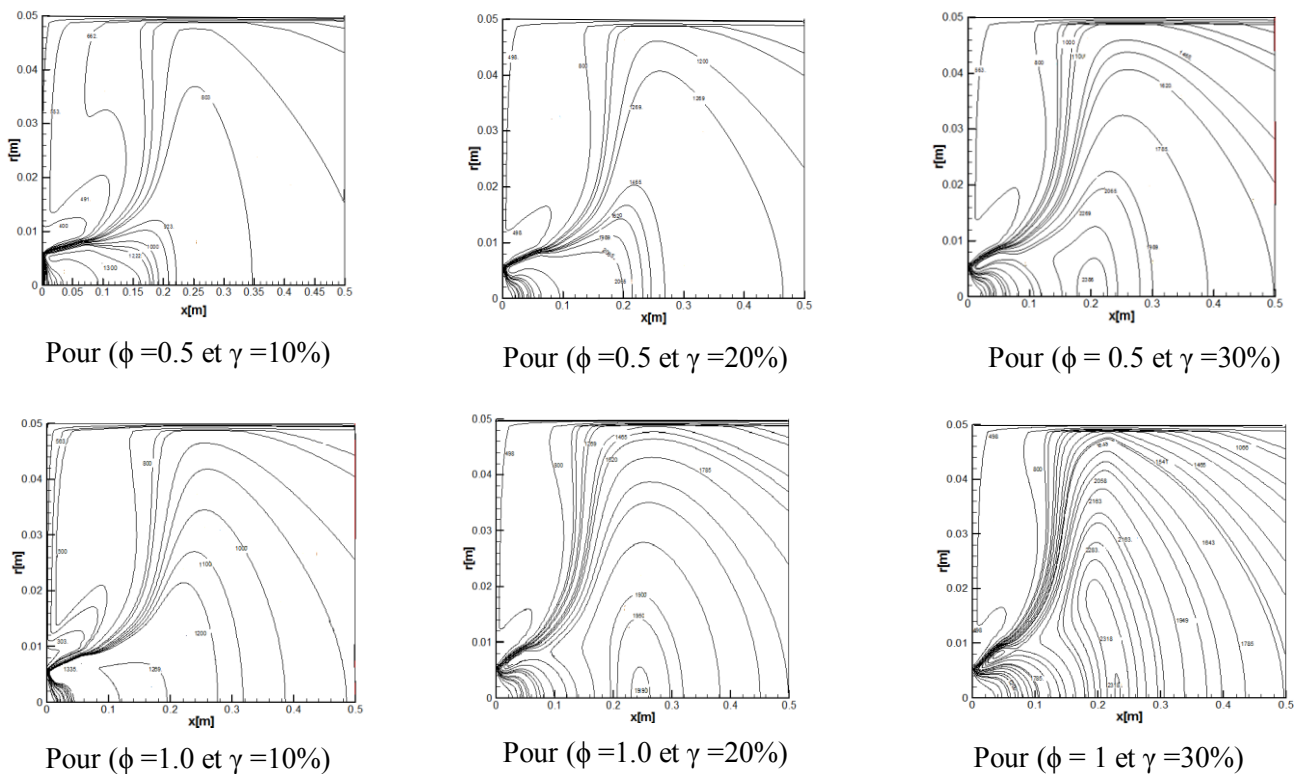


FIG. 3 – Contours de taux de réactions pour différentes richesses et pourcentages d'oxygène.

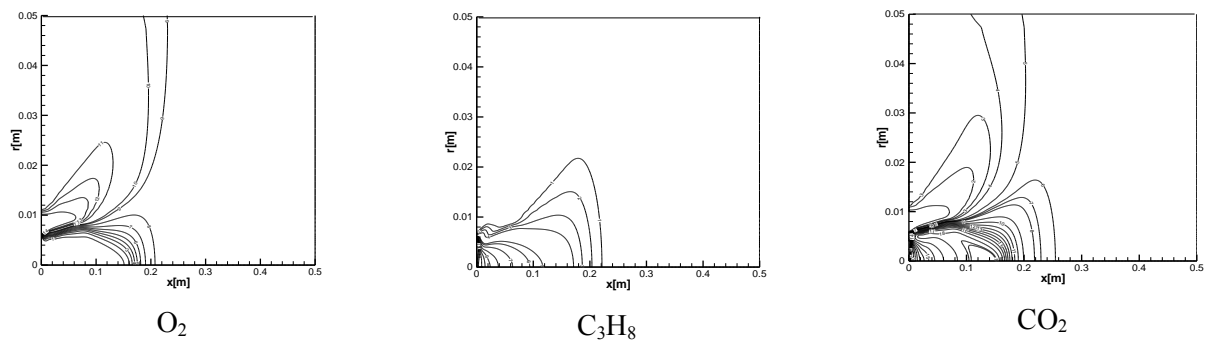


FIG. 4 – Les fractions massiques pour ($\phi=1$ et $\gamma=10\%$)

La figure 3 montre la variation de la température dans le brûleur propane-air. D'après les résultats on remarque, que la température augmente avec l'augmentation de ϕ de (0.5 à 1) et de γ de (10 à 30%), néanmoins les températures augmentent considérablement avec l'augmentation de γ de 10 à 30%, ce qui signifie que (γ) a plus d'effet sur la température que (ϕ). La température maximale de combustion est élevée (environ 2300 K), cela nécessite de prendre en considération l'effet de cette contrainte thermique sur le métal de construction du mur de la chambre de combustion.

Les distributions des fractions massiques sont illustrées dans la figure 4 pour le $\phi = 1$ et $\gamma = 10\%$. Ces distributions nous indiquent si la combustion produite est complète ou pas. Avec l'augmentation de la richesse ϕ de (0.5 à 1) les masses de CO_2 produites au cours de la combustion augmentent alors que la masse du O_2 diminue. Dans le cas stœchiométrique $\phi = 1$ (ou rapport excessif d'air $\lambda=1$), on se rapproche de la combustion complète.

6 Conclusions

Dans ce travail, la combustion du propane avec de l'air dans un brûleur a été considérée pour déterminer numériquement l'effet du pourcentage d'oxygène sur la combustion. Les effets du pourcentage d'oxygène dans l'air et les richesses sur la génération de combustion ont également été étudiés. Les conclusions tirées de cette étude peuvent être énumérées brièvement comme suit :

-L'augmentation de ϕ réduit d'une manière significative les de taux de réaction.

-Dans le cas de $\phi < 1$, la combustion est complète, et dans le cas de $\phi = 1$ (ou rapport excessif d'air $\lambda=1$), on se rapproche de la combustion complète.

-Les températures dans la chambre de combustion augmentent avec les augmentations de γ (de 10 à 30%) et de ϕ (de 0.5 à 1.0), respectivement. Le mélange d'hydrogène avec du propane entraîne une réduction considérable des niveaux de température et réduction conséquente des émissions de CO.

7 Références

1. S.R. Turns: An introduction to combustion - Concepts and application (McGraw Hill, Inc., New York, 1996).
2. C.E.L. Pinho, J.M.P.Q. Delgado et al - Defect and Diffusion Forum Vols. 273-276 (2008) pp 144-149
3. Fluent Inc. 2006 FLUENT 6.3.26 User's guide. (Fluent Inc.).
4. Launder. B.E. and Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England. (1972).

8 Nomenclature

Symboles grecs		Symboles latins	
δ_{ij}	Delta de Kronecker (=1 si $i=j$, =0 sinon)	A	Surface
η	Echelle de longueur de Kolmogorov	$C_\mu, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, \sigma_k$ et σ_ϵ	Constantes du modèle k- ϵ
ϵ	Taux de dissipation de l'énergie de turbulence	CFD	Computational Fluid Dynamics
ϕ	Richesse (rapport d'équivalence)	G_K	Taux de production de l'énergie
γ	Pourcentage de l'oxygène dans l'air	h_k	Enthalpie spécifique de l'espèce k
ψ	Fonction de dissipation	k	Energie de turbulence
λ	Coefficient d'excès d'air	P	Pression
μ	Viscosité dynamique	Q	Source de chaleur
μ_t	Viscosité turbulente	Rsto	Rapport stœchiométrique
ν	Viscosité cinématique	T	Température
ρ	Densité	u_i	Vitesse dans la direction i
σ_{ij}	Tenseur de la contrainte dans le plan i et la direction j	V	volume
τ_{ij}	Tenseur des contraintes visqueuses	W	Masse molaire